

УДК 669.017.07

Ткаченко І.Ф.<sup>1</sup>, Візенков Д.В.<sup>2</sup>

### **ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ КОНТРОЛЬОВАНОЇ ПРОКАТКИ НА МІЦНОСТНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕЙ**

*З використанням сучасних комп'ютерних технологій обробки багатовимірних масивів експериментальних даних досліджено зв'язки показників міцності прокату штрипсової сталі Х70 з параметрами технології його виробництва. Розроблено відповідні регресійні моделі та перевірена їх адекватність методом комп'ютерних експериментів. Визначено умови отримання високих показників міцності прокату сталей Х70 при збереженні технічно припустимого рівня спротиву руйнування.*

В останні десятиріччя в якості перспективного методу зміцнення металопрокату застосовується термомеханічна обробка (ТМО) [1]. В зв'язку з постійним зростанням вимог споживачів, особливу увагу приділяють подальшому підвищенню міцнісних характеристик прокату сталей після ТМО. За цих обставин важливе значення набуває визначення тих факторів, які справляють статистично значущий вплив на міцнісні властивості прокату в умовах сучасного промислового виробництва [2, 3]. Традиційний методологічний підхід до проведення статистичних досліджень, що використовується в теперішній час в галузі виробництва та зміцнення складно легованих сталей, неможна вважати достатньо ефективним, оскільки він не дозволяє розширити та поглибити знання закономірностей формування структури та властивостей широкої групи сучасних конструкційних матеріалів.

Метою дослідження є визначення впливу хімічного складу та параметрів технології контрольованої прокатки на міцнісні властивості листового прокату будівельних сталей. В роботах [4, 5] запропоновано комплексну комп'ютерну технологію, яка, в умовах багатовимірних масивів експериментальних даних забезпечує: виявлення об'єктивних закономірностей впливу технологічних параметрів на окремі характеристики експлуатаційних властивостей сталей; аналітичне та статистичне моделювання кожної незалежної змінної в умовах, як постійних, так і змінних значень інших керуючих параметрів; максимально повну перевірку адекватності математичних моделей за рахунок побудови кривих частотних розподілень показників властивостей та комп'ютерних парних кореляційних залежностей. Запропонований підхід дозволяє дати достатньо повну оцінку потенційних можливостей сталей та технології контрольованої прокатки в заданих умовах виробництва з точки зору досягнення максимального рівня властивостей [4, 5]. Дослідження виконувалися з використанням масивів експериментальних результатів здавальних випробувань властивостей прокату сталей типу Х70. Враховуючи те, що вимоги стандартів практично не відрізняються між собою для прокату різної товщини, подальший аналіз виконувався для об'єднаного масиву листів – усього 100 конвертерних плавок, біля 600 результатів. В якості ілюстрації на рис. 1а показано експериментальне частотне розподілення  $\sigma_{02}$ . З метою об'єктивної та кількісної оцінки середнього рівня  $\sigma_{02}$  та ступеня його статистичної стабільності розраховували значення приватного критерію якості [4, 5]:

$$Q\sigma_{02} = \frac{(\bar{\sigma}_{02} - \sigma_{02}^{st})}{3S\sigma_{02}} = 0,87 \quad (1)$$

<sup>1</sup>ПДТУ, д-р техн. наук, проф.

<sup>2</sup>ПДТУ, аспірант

Оскільки  $Q\sigma_{02} < 1$ , то це засвідчує, що більш ніж 5 % продукції в теперішній час не відповідає вимогам діючого стандарту. У зв'язку з цим досягнутий рівень виробництва неможна вважати задовільним. Виконано експериментальні дослідження впливу технологічних параметрів на міцнісні показники прокату з застосуванням методів стандартного регресійного аналізу. Як можна бачити з рис. 1б; 1в, де наведені діаграми розсіювання, що характеризують вплив технологічних параметрів на  $\sigma_{02}$ , велика кількість крапок лежить за межами довірчих інтервалів. Це свідчить про те, що використовувати метод кореляційного аналізу (КА) у даному випадку некоректно. Частка дисперсії, яка пояснюється наведеними рівняннями регресії не перевищує  $R^2 = 0,289$ .

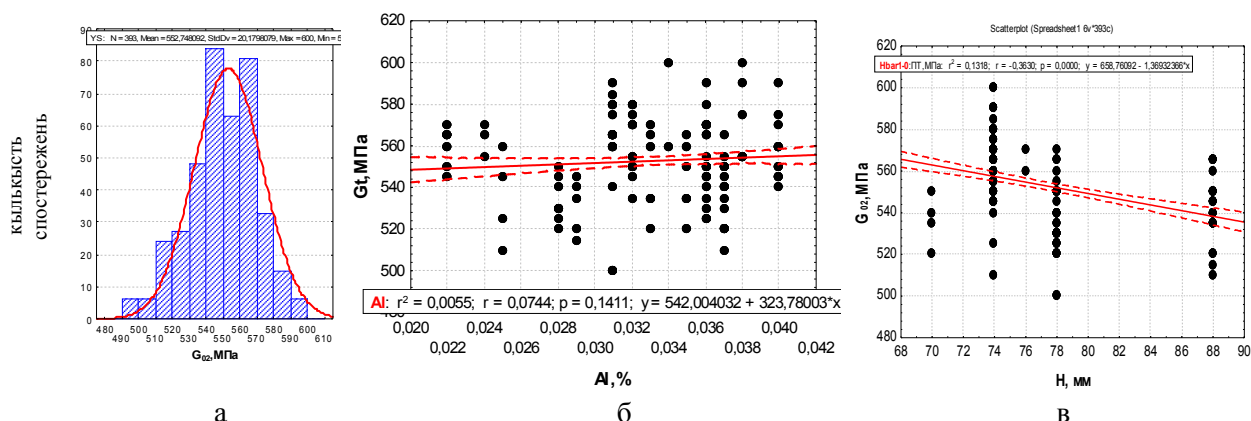


Рис. 1 – Експериментальне частотне розподілення  $\sigma_{02}$  (а) та кореляційні залежності  $\sigma_{02}$  від технологічних параметрів: б – вмісту Al; в – товщини підкату після чернкової кліти (H)

При допомозі глибокого розвідувального аналізу експериментальних даних була побудована дендрограма, що характеризує вплив технологічних факторів на рівень  $\sigma_{02}$ , яка зображена на рис. 2. Як можна бачити, статистично значущий вплив на  $\sigma_{02}$  справляють: температура перед останніми чотирма проходами на чистовій клітці ( $T_{cr}$ ); товщина підкату після чернкової кліти (H); вмісти Nb, Al та V. При цьому найбільш високе значення  $\sigma_{02} \approx 566$  МПа досягається при  $T_{cr} > 712,5$  °С. Найменший рівень  $\sigma_{02}$  досягається при вмісті Al  $< 0,029$  %, показниках  $H \leq 82$  мм та  $T_{cr} \leq 712,5$  °С.

На основі дендрограми методом поетапної множинної регресії розроблена математична модель, що відображає зв'язок  $\sigma_{02}$  з параметрами технології виготовлення штрипсових сталей.

$$\sigma_{02} = 400 + 241 \cdot (T_{cr} - 650) + 4.15 \cdot 10^6 \cdot Al + 900 \cdot (H - 50) - 2.39 \cdot 10^5 \cdot V - 5.4 \cdot 10^3 \cdot T_{cr} \cdot Al - T_{cr} \cdot H - 3.9 \cdot 10^3 \cdot Al \cdot H + 307 \cdot T_{cr} \cdot V + 278 \cdot H \cdot V - 7.7 \cdot 10^5 \cdot Al \cdot Nb$$

$$Al = 10^4 \cdot [Al]; V = 10^2 \cdot [V]; Nb = 10^3 \cdot [Nb], \text{ де } [Al], [V], [Nb] - \text{концентрації відповідних хімічних елементів (ваг/\%)}. \quad (2)$$

Рівняння (2) виконується при умовах, що значення параметрів технології змінюються в діапазонах встановлених технологічною інструкцією з виробництва прокату трубних сталей в умовах ВАТ «МК «Азовсталь». Як бачимо з математичної моделі, безпосередній вплив на  $\sigma_{02}$  справляють:  $T_{cr}$ ; Al; H; V. Перевірку адекватності виконували методом «Монте-Карло» [5].

На рис. 3 показана крива експериментального частотного розподілення  $\sigma_{02}$  та комп'ютерна гістограма, побудована з застосуванням моделі (2). Як можна бачити з порівняння наведених даних досягається достатньо точне співпадіння отриманих частотних розподілень, що свідчить про достатню адекватність розробленої моделі (2) в прогнозуванні середніх значень та стандартних відхилень  $\sigma_{02}$  прокату сталей X70. На мал. 4. зображені розраховані діаграми розсіювання, які характеризують сумісний вплив параметрів технології виробництва на  $\sigma_{02}$ . Як можна бачити з рис. 4б та 4в з ростом H та збільшенням вмісту Al при одночасній зміні всіх інших технологічних параметрів, спостерігається зміна  $\sigma_{02}$ . Коефіцієнт кореляції для отриманих комп'ютерних залежностей складає 0,574 та 0,105, відповідно (див. рис. 1б та 1в). Особливо слід підкреслити достатньо точно співпадають коефіцієнти кореляції, отримані на основі комп'ютерних та реальних експериментів. Такі результати додатково засвідчують можливість прогнозування закономірностей впливу технологічних параметрів на показники якості.

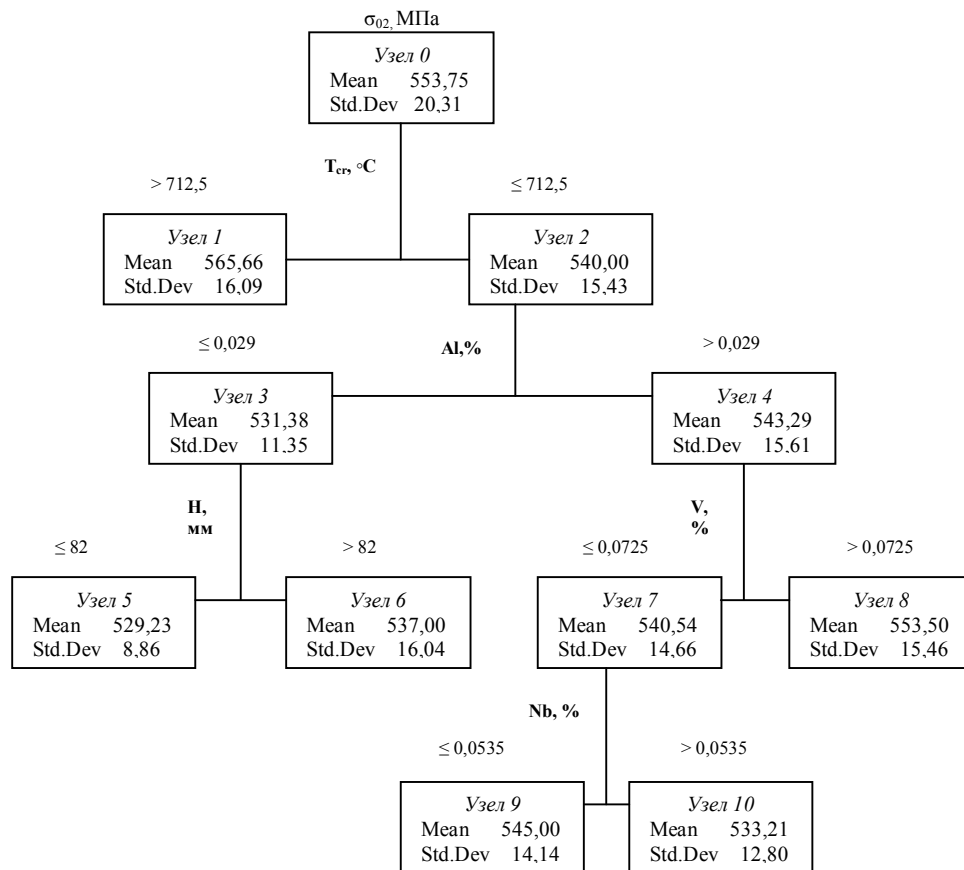
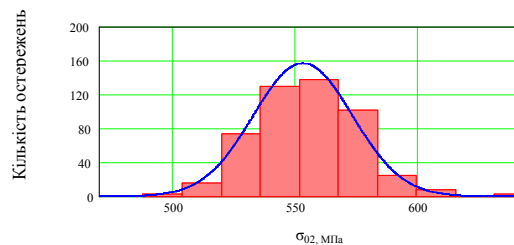
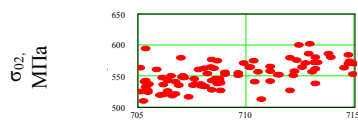


Рис. 2 – Дендрограма, яка характеризує вплив технологічних факторів на рівень  $\sigma_{02}$ .



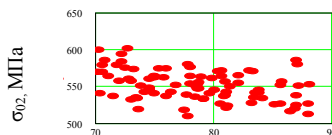
$k_y = 0,574$



Tcr, °C

$k_y = -0,397$

а

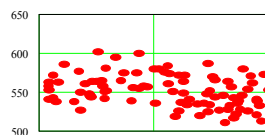


H, мм

в

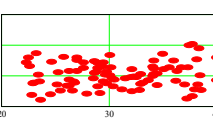
$\sigma_{02}$ , МПа

$k_y = -0,322$



Nb·10³, %

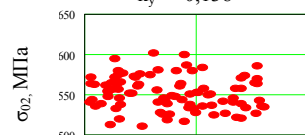
г



Al·10³, %

б

$k_y = -0,138$



V·10³, %

д

Рис. 3 – Співвідношення експериментальних та комп'ютерних частотних розподілень  $\sigma_{02}$ .

Рис. 4 – Комп'ютерні діаграми розсіювання, які характеризують сумісний вплив технологічних факторів на межу течії: а – температура перед останніми чотирма проходами на чистовій клеті; б – вміст Al; в – товщина підкату після чернкової клеті; г – вміст Nb; д – вміст V

На рисунках 4в – 4д зображені залежності, з яких можна зробити висновок, що при підвищенні:  $H$ , вмістів  $Nb$  і  $V$  та одночасній зміні всіх інших технологічних параметрів, спостерігається зниження показника якості  $\sigma_{02}$ . Коефіцієнти кореляції для отриманих комп'ютерних залежностей складають - 0,397, - 0,322 та - 0,138 відповідно, що достатньо точно співпадає з результатами стандартного кореляційного аналізу експериментальних даних. Враховуючи високу адекватність розробленої регресійної моделі (2) – вона була використана для визначення умов отримання максимального рівня міцності прокату сталі X70. Як впливає з наведених діаграм найбільш високі та стабільні значення  $\sigma_{02} = 620 - 650$  МПа можуть бути досягнуті при  $H = 60 - 65$  мм,  $T_{cr} = 705 - 715$  °С, а також підвищених концентраціях  $Nb$ ,  $Al$  та  $V$ . Встановлено, що за досліджених умов, рівень показників роботи руйнування та пластичності є в межах, що відповідають вимогам діючого стандарту.

#### Висновки

1. Методами комп'ютерного статичного аналізу показано, що існуючий рівень виробництва прокату не забезпечує перевищення вимог діючих стандартів з вірогідністю  $> 95\%$ .
2. Показана некоректність використання стандартних методів регресійного аналізу, задля встановлення закономірностей впливу параметрів технології на властивості прокату.
3. З використанням сучасних методів комп'ютерних статистичних досліджень багатомірних масивів експериментальних даних визначені технологічні параметри, які справляють статистично значущий вплив на експлуатаційні властивості прокату.
4. Методами багатофакторної регресії розроблено математичні моделі, що відбивають вплив статистично значущих параметрів технології на показники якості прокату та перевірена їх адекватність, досліджено сумісний та роздільний вплив параметрів технології виробництва та зміцнення прокату на його механічні властивості.
5. Встановлено, що найбільш високі та стабільні значення  $\sigma_{02} = 620 - 650$  МПа при збереженні достатнього рівня спротиву руйнування можуть бути досягнуті при товщині підкату  $60 - 65$  мм, температурі листів перед останніми чотирма проходами  $705 - 715$  °С, а також підвищених концентраціях  $Nb$ ,  $Al$  та  $V$ .

#### Перелік посилань

1. Бернштейн М.Л. Технология термической обработки стали. пер. с нем. / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1981. – 608 с.
2. Ганошенко И.В. Контролируемая и термомеханическая прокатка на стане 3600 толстолистовой стали для труб большого диаметра, в том числе по международным стандартам / И.В. Ганошенко, В.В. Володарский // Прогрессивные толстолистовые стали для газонефтепроводных труб большого диаметра и металлоконструкций ответственного назначения: сб. докл. Междунар. научно-технической конференции “Азовсталь–2002”, Мариуполь, [2002]. – М., 2004. – С. 29 – 33.
3. Разработка и технологический процесс производства трубных сталей в XXI веке / Ю.И. Матросов [и др.] // Сталь. – 2001. – № 4. – С. 58 – 62.
4. Ткаченко И.Ф. Многоцелевая оптимизация технологии термического упрочнения проката высокопрочных свариваемых сталей с использованием компьютерной технологии «Data Mining» / И.Ф. Ткаченко // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб.наук.праць. – Маріуполь, 2004. – № 14. – С. 111–117.
5. Ткаченко И.Ф. Моделирование влияния химических элементов на прочностные свойства комплексно–легированной бор–содержащей стали методами Монте–Карло / И.Ф. Ткаченко, В.И. Большаков, О.П. Косенко // Металлознавство та термічна обробка металів. – 2005. – № 4 (31). – С. 42 – 54.

Рецензент: В.Г. Єфременко,  
д-р техн. наук, проф., ПДТУ

Стаття надійшла 17.03.2009